

Т. В. Гоненко¹, В. Ф. Хацевский²,

¹Омский государственный технический университет, Омск, Россия

²Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова,
Павлодар, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКИПЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВЕ ЖИДКОСТЕЙ

In article scaling problems on heating surfaces are considered. Ways of decrease in intensity of emergence a scum process are offered. The results of researches for a scaling processes for the reason increasing of an electric heaters lifetime are presented.

Взаимодействие воды с нагревающей поверхностью в промышленном оборудовании сопровождается термохимическими процессами образования карбонатных соединений (накипи), которые определяются жесткостью воды и термомассообменными условиями электронагрева.

Общая жесткость воды состоит из карбонатной и некарбонатной жесткости. Температурные условия на нагревающей поверхности определяются интенсивностью теплового потока и уровнем конвективного взаимодействия воды с этой поверхностью. Электроустановки, выпускаемые промышленностью, обеспечивают нагрев воды при плотностях теплового потока $(1...8) \cdot 10^4$ Вт/м². Длительность безремонтного периода работы таких систем на основе трубчатых электронагревателей (ТЭН) ограничивается скоростью отложений (накипи) на поверхности нагревателей и при толщине отложений в 0,5 мм составляет не более 8000...10000 часов. Современные электродные котлы, в которых нагрев воды осуществляется за счет пропускания через воду электрического тока, сохраняют свои нагрузочные характеристики в течение 1000...1500 часов. Затем происходит снижение мощности из-за накопления на электродах отложений.

Количественный анализ термохимических процессов образования накипи показал, что предотвратить или существенно снизить скорости солеотложений на нагревающих поверхностях возможно двумя путями. Первый путь связан с организацией в рабочем пространстве установок вблизи нагревающих поверхностей специальных термогидродинамических режимов движения нагреваемой воды, обеспечивающих интенсивное протекание объемных

процессов солеобразования с локальным перегревом воды вблизи поверхности нагрева до температуры насыщения. Такое кипение возникает при плотностях теплового потока более $(6...8) \cdot 10^4$ Вт/м² независимо от температуры нагреваемой воды. При этом за счет направленной перпендикулярно поверхности нагрева термодиффузии обеспечивается предотвращение формирования из образующихся частиц солей отложений на поверхности нагрева. Второй путь снижения накипеобразования связан с реализацией нагрева воды при плотностях теплового потока $(1...5) \cdot 10^4$ Вт/м² до температур, при которых интенсивного образования накипи не происходит (не более 70 °С).

Разработанные электротехнологии изготовления плоских электронагревателей на основе плазменного напыления тонких электроизоляционных и электропроводящих слоев, наносимых на основу-подложку привели к созданию новых плазменно-напыленных плоских нагревателей [1], позволяющих обеспечивать введение больших мощностей в нагреваемый объем воды за счет большой теплоотдающей поверхности нагревателей при плотностях теплового потока равных $(1...5) \cdot 10^4$ Вт/м².

Использование таких нагревателей перспективно при создании индивидуальных аккумуляционных систем нагрева воды. При территориальном совмещении с местом потребления воды обеспечивается нагрев воды до температуры 70 °С с минимальным перепадом температуры между нагревателем и аккумуляционным объемом воды. Такие соотношения технических параметров позволили выделить новую самостоятельную область для электротехнологического оборудования, в которой возможно существенно снизить интенсивность протекания процессов накипеобразования при сохранении потребительских характеристик систем нагрева воды. Появление нового технического решения потребовало комплексного исследования его эксплуатационных характеристик.

Для нормального теплового и гидродинамического режимов работы нагревающей поверхности необходимо, чтобы величина карбонатной жесткости

воды была минимальной, но в то же время обеспечивающей образование на теплонагреваемых поверхностях слоя накипи, предохраняющей эту поверхность от коррозии. Поставлена задача изучения скорости образования накипи в зависимости от карбонатной жесткости воды.

При математическом описании кинетики образования накипи принято допущение, что вода по всему нагреваемому объему, за исключением тонкого диффузионного слоя у нагревающей поверхности, интенсивно перемешивается. Это обеспечивает квазипостоянство в ограниченный период времени жесткости воды по всему объему (V) и некоторый градиент концентрации в диффузионном слое. Кроме этого, учитывается, что в задачу данного исследования не входит рассмотрение термодинамических условий накипеобразования и, следовательно, любое карбонатное соединение $(Ca, Mg, Fe)CO_3$, нерастворимое в воде, оседает на поверхности нагрева и выводится из рассматриваемого диффузионного процесса. Это дает возможность принять исходное положение: любое уменьшение жесткости нагреваемой воды в процессе ее нагрева можно приравнивать массе образующейся накипи.

Кинетика таких процессов описывается уравнением второго закона Фика:

$$dm_{Ca, Mg} / d\tau = -\beta \cdot S (\mathcal{K}_{Ca, Mg}^0 - \mathcal{K}_{Ca, Mg}^{\tau}), \quad (1)$$

где $m_{Ca, Mg}$ – количество карбонатнообразующих элементов в воде, равное произведению концентрации $\mathcal{K}_{Ca, Mg}$ на объем нагреваемой воды V ;

β – коэффициент массопередачи при $T = \text{const}$, $v_{H_2O} = \text{const}$;

S – поверхность нагрева;

$\mathcal{K}_{Ca, Mg}^0$, $\mathcal{K}_{Ca, Mg}^{\tau}$ – концентрация карбонатнообразующих элементов в воде (жесткость воды) в начале нагрева и в конце нагрева; τ – время.

После интегрирования в пределах от 0 до τ при концентрациях от $\mathcal{K}_{Ca, Mg}^0$ до $\mathcal{K}_{Ca, Mg}^{\tau}$ получено (2):

$$\mathcal{K}_{Ca, Mg}^{\tau} = \mathcal{K}_{Ca, Mg}^0 \cdot e^{-\beta / p}, \quad (2)$$

где $p = V/S \cdot \tau$ – удельная скорость процесса накипеобразования на единицу

нагревающей поверхности.

Результаты экспериментов обработаны с использованием выражения (2) следующим образом:

$$\ln(\mathcal{K}_{Ca, Mg}^0 / \mathcal{K}_{Ca, Mg}^{\tau}) = \beta \frac{S}{V} \tau; \quad \beta = p \cdot \ln(\mathcal{K}_{Ca, Mg}^0 / \mathcal{K}_{Ca, Mg}^{\tau}).$$

Интенсивность накипеобразования (m) определялась по изменению жесткости воды в процессе нагрева (3):

$$m = [\mathcal{K}_{Ca, Mg}^0 (1 - e^{-\beta / p}) \cdot V] / S \cdot \tau, \quad (3)$$

а время обработки воды

$$\tau = V / \nu_{H_2O},$$

где V – объем воды в нагревающем устройстве; ν_{H_2O} – расход воды.

Экспериментальные исследования процесса накипеобразования с целью определения коэффициентов массопередачи (β) проводились на установке с горизонтально расположенным нагревателем с возможностью изменения мощности P от 2 до 8 кВт. Площадь нагревающей поверхности $S = 0,3 \text{ м}^2$; объем нагреваемой воды $V = 0,1 \text{ м}^3$; расход воды изменяется от $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ до $0,002 \text{ м}^3/\text{с}$. Температура воды на входе составляла $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, на выходе – $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Температуру нагревающей поверхности можно было изменить от $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Значение исходной карбонатной жесткости воды изменялось ступенчато: 1,5; 2,5; 4,2; 6,2 мг экв/кг.

На рисунке 1 приведены зависимости минимальных температур T_{min} нагревающих поверхностей от жесткости воды, при которых накипеобразование практически не наблюдается, а на рисунке 2 приведены зависимости интенсивности накипеобразования при $T > T_{min}$ от величины карбонатной жесткости при разных температурах нагревателя.

Полученные характеристики позволяют рассчитать срок службы плоского плазменно-напыленного нагревателя при увеличении его температуры за счет появления слоя накипи до допустимой температуры.

При известном значении m при конкретных температурах нагревающей

поверхности $T_{нагр}^{max}$ и исходной жесткости воды возможно определить гарантированный срок службы нагревателя (4):

$$\tau = \frac{\gamma_{нак} \cdot \lambda_{нак}}{m_{\tau}} \left\{ \left[(T_{нагр}^{max} - T_{воды}) / q \right] - (\delta_{подл} / \lambda_{подл}) - \left(1 / \alpha_{H_2O} \right) \right\}. \quad (4)$$

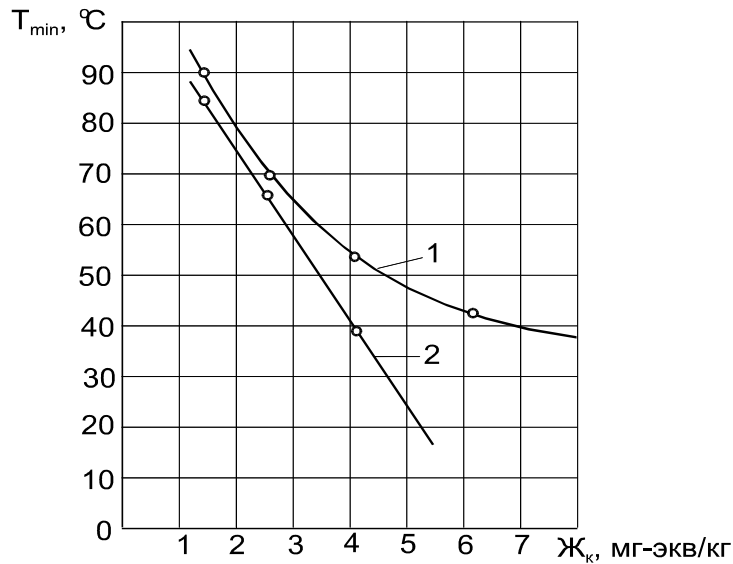


Рис. 1. Зависимость минимальных температур нагревателя от жесткости воды:

1 – прямоточная система, 2 – обратная система

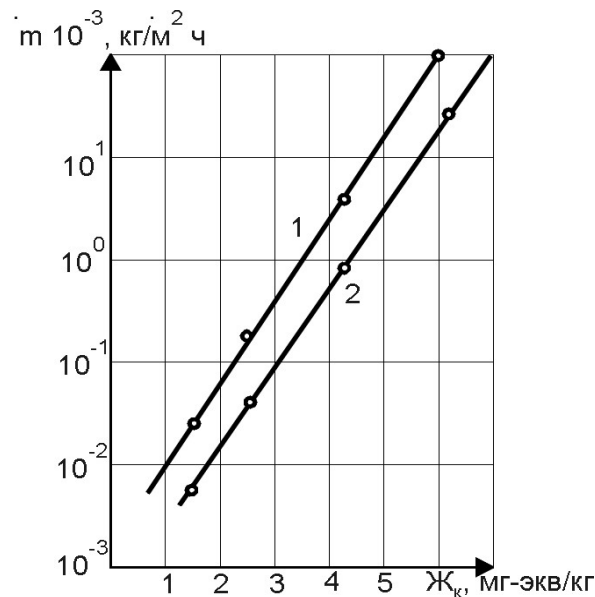


Рис. 2. Зависимости интенсивности накипеобразования от величины карбонатной жесткости:

1 – температура нагревателя $T = 150$ °C; 2 – температура нагревателя $T = 100$ °C

Полученное уравнение позволяет определить срок службы нагревателя. С учетом рекомендаций по выбору максимальной рабочей температуры плазменно-напыленных нагревателей, обеспечивающей длительность работы без накипи $\tau > 10^5$ ч, принято $T_{нагр}^{max} = 150$ °С.

Исходные данные: жесткость нагреваемой воды $Ж_{Ca,Mg}^0 = 2,5$ мг-экв/кг; начальная температура нагревателя $T_{нагр} = 100$ °С; допустимая температура нагревателя через τ часов эксплуатации $T_{нагр}^{max} = 150$ °С.

С использованием зависимостей рисунка 2 определено

$$m_{\tau} = (m_0 + m_{\tau})/2 = (0,05 + 0,11) \cdot 10^{-3}/2 = 0,08 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}; q = 2,7 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2;$$

$T_{воды} = 70$ °С; $\gamma_{нак} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_{нак} = 0,581 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$ (при пористости 24...30 %); $\delta_{подл} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\lambda_{подл} = 85 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$; $\alpha_{H_2O} = 1000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$.

$$\tau = \frac{1,8 \cdot 10^3 \cdot 0,581}{0,08 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{150 - 70}{2,7 \cdot 10^4} - \frac{5 \cdot 10^{-3}}{85} - \frac{1}{1000} \right) = 24890 \text{ ч}$$

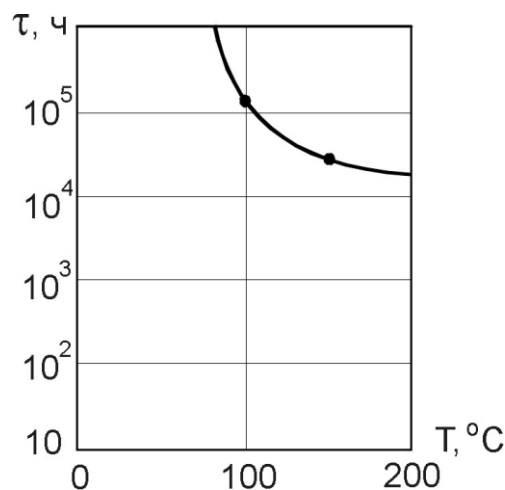


Рис. 3. Влияние температуры нагревателя на его ресурс

На рисунке 3 приведена зависимость, показывающая влияние температуры нагревающей поверхности с учетом накипеобразования на срок службы рассмотренного нагревателя. Как видно, время непрерывной работы новых плазменно-напыленных нагревателей до профилактического ремонта (удаление образующейся накипи) во много раз превышает нормативный срок службы.

1. Хацевский, К. В. Энергоэффективные технологии электронагрева жидкостей и газов [монография] / К. В. Хацевский, Т. В. Гоненко. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 176 с.